

УДК: 004.932.2

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ ХОРИОИДЕИ И ЕЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ГЛАЗА¹

© 2024 г. Н. С. Демин^{1, 2, *}, Н. Ю. Ильясова^{1, 2, **}, Р. Т. Самигуллин^{1, ***}

¹Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

* e-mail: volfgunus@gmail.com

** e-mail: ilyasova.nata@gmail.com

*** e-mail: samigullin.ravil2015@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.

После доработки 22.02.2024 г.

Принята к публикации 13.05.2024 г.

Предлагается технология выделения сосудистой ткани глаза человека и подсчета хориоидального сосудистого индекса на изображениях оптической когерентной томографии. Хориоидея представляет собой одну из наиболее васкуляризованных структур человеческого тела и играет незаменимую роль в питании фоторецепторов. Предлагаемый нами подход для диагностического анализа области хориоидеи основан на использовании метода компенсации теней изображений оптической когерентной томографии с последующей их фильтрацией и бинаризацией. Технология позволила автоматизировать подсчет значения хориоидального сосудистого индекса, который служит важным показателем в исследовании сосудистого слоя при проведении диагностики заболеваний глаза. Рассмотрена технология выделения области хориоидеи и количественной оценки хориоидального сосудистого индекса на изображениях оптической когерентной томографии для выявления эндокринной офтальмопатии. Хориоидея – одна из наиболее васкуляризованных структур человеческого тела и играет незаменимую роль в питании фоторецепторов.

Ключевые слова: биомедицинские изображения, изображения оптической когерентной томографии, пороговая обработка, хориоидея, количественные характеристики, количественный анализ

DOI: 10.31857/S0002338824030172 EDN: UPHZSO

METHOD OF CHORIOIDEA AREA EXTRACTION AND ITS QUANTITATIVE ANALYSIS ON OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY IMAGES FOR DIAGNOSTICS OF EYE DISEASES²

N. S. Demin^{a, b, *}, N. Yu. Ilyasova^{a, b, **}, R. T. Samigullin^{a, ***}

^a Image Processing Systems Institute, NRC “Kurchatov Institute”, Samara, Russia

^b Samara National Research University, Samara, Russia

* e-mail: volfgunus@gmail.com

** e-mail: ilyasova.nata@gmail.com

*** e-mail: samigullin.ravil2015@yandex.ru

The paper proposes a technology for extraction of vascular tissue of the human eye and calculation of chorioidal vascular index on optical coherence tomography images. The applied approach is based on the use of the method of shadow compensation of optical coherence tomography (OCT) images with their subsequent filtering and binarisation. The technology made it possible to automate the calculation of chorioidal vascular index value, which is an important indicator in the study of the vascular layer when diagnosing eye diseases.

¹ Работа выполнена по госзаданию НИЦ «Курчатовский институт».

² This work was performed within the State Assignment of NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia.

Keywords: biomedical images, optical coherence tomography images, thresholding, charyoid, quantitative features, quantitative analysis

Введение. Изучение анатомических особенностей хориоидеи является основополагающей ролью во многих процессах функционирования и развития глаза и зрения. Хориоидея – богатая сосудами ткань организма, обеспечивает кислородом и питательными веществами пигментный эпителий и наружные слои сетчатки, поддерживает внутриглазное давление и температуру глазного яблока, принимает участие в фокусировке изображения на сетчатке, поэтому дефекты хориоидеи выступают провоцирующим фактором ряда заболеваний глаза [1]. Информация о структуре глазного дна, включающей анатомические и патологические элементы, обычно извлекается при помощи оптической когерентной томографии (ОКТ) и фундус-камер. Использование цифровых методов позволяет упростить работу врача-офтальмолога за счет решения задач, с которыми человек не справляется за ограниченный промежуток времени.

Искусственный интеллект дает возможность решать задачи диагностики заболеваний глазного дна, лечения глазных заболеваний и т.д. Анализ диагностических данных проводится с помощью таких технологий искусственного интеллекта, как применение сверточных нейронных сетей, интеллектуальный анализ данных и др. [2, 3]. Указанные методы используются для выделения области хориоидеи с целью ее дальнейшего диагностического анализа, что является предварительным этапом формирования данных для обработки.

Диагностика хориоидеи проводится с помощью ОКТ, которая позволяет получать данные об отражательной способности тканей с разрешением по глубине с помощью сканирующего источника ближнего инфракрасного излучения. Данные представлены в виде массивов пикселей или вокселей, в которых яркость кодирует отражательную способность фокальной ткани. Значимое наблюдение за задним сегментом глаза возможно, потому что ткани достаточно прозрачны, чтобы обеспечить проникновение фотонов под поверхность, но достаточно непрозрачны и оптически неоднородны, чтобы возвращать структурно релевантные и информативные отражения.

1. Постановка задачи. Визуализация хориоидеи с помощью ОКТ является сложной задачей из-за маскирующего эффекта относительно непрозрачного пигментного эпителия сетчатки. Традиционно визуализированные изображения ОКТ заднего сегмента содержат тени, которые влияют на визуализацию глубоких структур, в том числе хориоидеи. Улучшенная визуализация глубины и усреднение улучшают визуализацию сосудистой оболочки на поперечных ОКТ-сканах, но усреднение требует многократных проходов сканирования и продлевает время сбора данных [4]. ОКТ со свип-источником использует настраиваемый лазер и позволяет быстро получать плотные растровые сканы. Он также работает на более длинных волнах и обеспечивает более глубокое проникновение в ткани, так что вся толщина сосудистой оболочки лучше визуализируется, хотя и с постоянными тенями от передних структур [5]. Качественный анализ изображений, полученных с помощью этих стратегий, дал важную информацию о заболеваниях, при которых изменения в архитектуре сосудов хориоидеи считаются этиологическими, и вызвал растущий интерес к количественной оценке этих изменений с использованием автоматизированных алгоритмов.

Для количественной оценки хориоидеи были разработаны различные критерии оценки, включая толщину хориоидеи, объем и хориоидальный сосудистый индекс (СВИ). Индекс сосудистого русла хориоидеи представляет собой отношение объема просвета к общему объему хориоидеи [6–9]. К настоящему времени опубликовано множество исследований, посвященных СВИ и его потенциальному применению для оценки и лечения некоторых заболеваний сетчатки и сосудистой оболочки [10–14].

Целью наших исследований является выделение зоны хориоидеи, подсчет признаков в выделенной зоне для дальнейшего диагностического анализа по классам нормы и патологии рис. 1. Для этого был разработан метод предобработки изображений ОКТ и морфологический анализ зон интереса. Результаты работы будут использованы для последующих исследований, в том числе для выделения зоны интереса посредством машинного обучения и диагностического анализа.

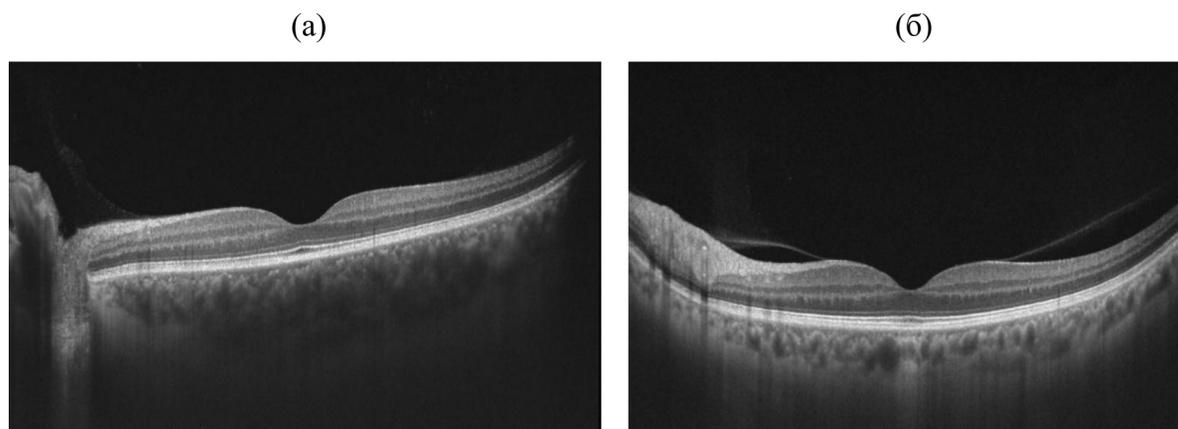


Рис. 1. Изображение исходного В-скана ОКТ глазного дна. а – без патологии; б – с патологией.

Аналогичный метод обработки данных изображений был представлен в работе [15], главная цель которой – оценка хориоидального индекса, а выделение интересующих зон происходит вручную в соответствии с международной номенклатурой для ОКТ.

2. Идея предлагаемого подхода. Для автоматизации выделения области хориоидеи и ее количественного анализа на ОКТ изображениях была разработана технология выделения зоны интереса и подсчета хориоидального сосудистого индекса, основными этапами которой являются:

- 1) теневая компенсация;
- 2) бинаризация снимка;
- 3) фильтрация бинаризованного изображения;
- 4) подсчет хориоидального индекса;

На рис. 2 приведена схема технология выделения зоны интереса и подсчета хориоидально-сосудистого индекса.

2.1. Компенсация теней. Количественный анализ сосудистой оболочки затруднен из-за теней, отбрасываемых передними структурами, такими как сосуды сетчатки. Поэтому компенсация теней важна для успешного и надежного количественного ОКТ-анализа, особенно сосудистой оболочки и других субретинальных структур пигментного эпителия [15, 16].

Теоретическое физическое ограничение, накладываемое тенями ОКТ, заключается в сокращении динамического диапазона более глубоких значений отражательной способности. Доступные нам изображения были закодированы в 8-битной шкале серого, где каждый пиксель или воксель представлен целым числом от 0 до 255. Тени накладывают еще меньший диапазон на более глубокие ткани, что может запутать определенные типы анализа. На практике, однако, включение компенсации теней производителями устройств выше по цепочке инструментов позволило бы им использовать необработанные данные отражательной способности, которые обычно собираются с гораздо большей точностью [17]. Компенсация теней выполнялась с помощью алгоритма Жирара.

Каждое В-сканирование преобразуется в область необработанной интенсивности, а интенсивность каждого пикселя умножается на уникальный коэффициент компенсации, полученный на основе особенностей сигнала ОКТ. Этот метод также повышает контрастность изображения кровеносных сосудов [17].

Непосредственно теневая компенсация изображения определялась следующим уравнением:

$$s(z) / \int_z^{\infty} s(u) du = \alpha_{r_s}(z) = HD\{s(z)\}, \quad (2.1)$$

где HD – оператор, переводящий заданный сигнал $s(z)$ в его скомпенсированную форму, α – коэффициент затухания, $s(z)$ – А скан ОКТ, который на изображении представляет собой вертикальные линии толщиной в 1 пиксель, $r_s(z)$ – амплитуда сигнала $s(z)$.

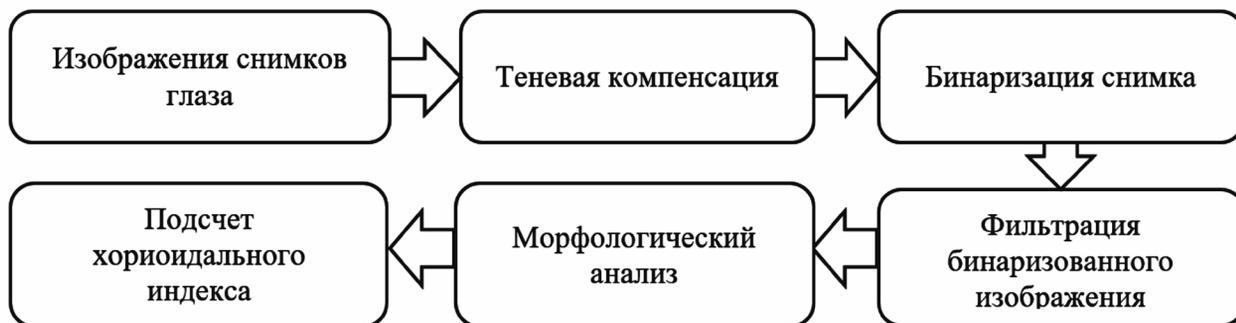


Рис. 2. Технология выделения зоны интереса и подсчета хориоидального сосудистого индекса.

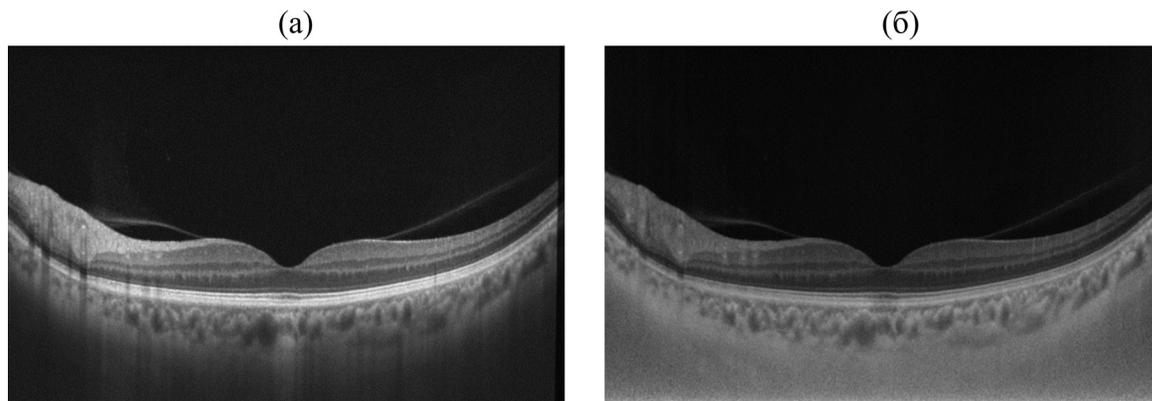


Рис. 3. а – необработанный В-скан ОКТ; б – изображение с компенсацией теней.

Усиление контраста выполнялось до теневой компенсации изображения, которое описывается следующей формулой:

$$HD\{I^n(z)\} = I^n(z) / 2 \int_z^\infty I^n(u) du, \quad (2.2)$$

где I – интенсивность пикселей, n – показатель степени (в рамках данной работы равен 2).

Метод позволил значительно улучшить качество изображения (рис. 3, б).

Применение компенсации теней может распространяться на ангиографию с оптической когерентной томографией (ОКТА), в которой используются кратковременные данные структурной ОКТ для определения местонахождения динамических вокселей с помощью методов декорреляции и для определения кровотока [18]. Из-за относительной прозрачности глазных структур эффекты декорреляции, возникающие в относительно передних вокселях, проецируются на относительно задние гиперрефлективные структуры.

Появление проекционных артефактов на ангиографических сегментах ОКТ en face глубоких тканей затрудняет количественный анализ глубоких капиллярных сплетений сетчатки и, возможно, неоваскулярной ткани, что требует разрешения проекции в программном обеспечении [19].

2.2. Бинаризация. Бинаризация ОКТ-изображения облегчает количественную оценку люминальной и стромальной областей хориоидеи [9, 10, 20]. Для выделения области просвета сосудов использовалась бинарная обработка. Первым шагом выполнялось адаптивное выравнивание гистограмм на уровне отдельных В-сканов для увеличения контраста сосудов сосудистой оболочки. Далее осуществлялась бинаризация изображения. Из-за разности распределения яркостей между отдельными снимками применение глобального порога проблематично. В связи с этим для бинаризации применялся метод адаптивной пороговой обработки Ниблэка. Изображение обрабатывается с помощью окна. Для каждого положения окна считается свой порог:

$$threshold = mean + k s, \quad (2.3)$$

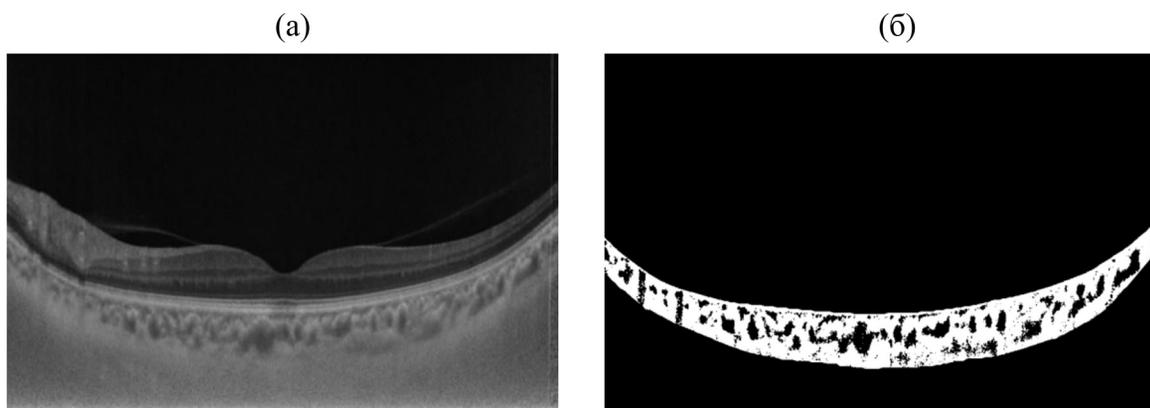


Рис. 4. а – изображение с компенсацией теней; б – бинаризованный слой хориоидеи.



Рис. 5. а – бинарное изображение; б – отфильтрованное изображение.

где $mean$ – среднее значение яркости пикселей в окне, s – стандартное отклонение значений яркости в окне, а k – коэффициент для отделения объекта от фона. Соответственно алгоритм бинаризации имеет 2 параметра: размер окна и коэффициент k . В ходе исследований наилучшее среднее значение для максимальной разделяемости классов дало окно размером 41 пиксель и параметр $k = 0.03$. Пример бинаризованного изображения представлен на рис. 4.

2.3. Фильтрация шумов. Для избавления от шумов на бинаризованном изображении использовались методы морфологической обработки изображений [21]. Проводилось вскрытие (последовательное применение операций эрозии и дилатации) изображения с структурным элементом вида эллипс размером 5×5 . Пример отфильтрованного изображения показан на рис. 5.

2.4. Хориоидальный индекс. Для изображений хориоидеи на В-сканах был предложен такой критерий, как сосудистый индекс хориоидеи. Подсчет сосудистого индекса хориоидеи определялся по формуле:

$$CVI = \frac{LCA}{TCA}, \quad (2.4)$$

где CVI – хориоидальный сосудистый индекс, LCA – общая площадь просвета сосудов, TCA – общая площадь поперечного сечения.

С момента появления CVI в многочисленных исследованиях оценивалась его эффективность в качестве инструмента для прогнозирования заболевания и мониторинга прогрессирования с многообещающими результатами [1]. CVI был создан из-за необходимости более надежной и точной оценки хориоидальной сосудистой сети [22–24]. Хориоидальный сосудистый индекс определяется как отношение площади просвета сосудов к общей площади сосудистого слоя [25]. Расчеты проводились для изображений ОКТ с патологией и без патологии.

Таблица. Значения оценок хориоидальных параметров для двух классов изображений ОКТ сетчатки

Вид изображения	Отношение сосудов к общей площади	Высота, мкм				
		-800 от фовеа	-400 от фовеа	0 от фовеа	+400 от фовеа	+800 от фовеа
Патология	0.47 ± 0.04	282 ± 60	293 ± 62	300 ± 60	300 ± 62	300 ± 64
Норма	0.54 ± 0.05	479 ± 80	500 ± 78	530 ± 80	536 ± 80	550 ± 84

Данные для исследования были предоставлены Московским стоматологическим университетом им. А.И. Евдокимова (кафедра офтальмологии), всего было 25 образцов с патологией и 25 без патологии. Открытая база данных В-сканов глазного дна для анализа хориоидального слоя с соответствующей разметкой отсутствует. Индекс рассчитывался на ограниченной области по 1000 нм влево и вправо от фовевы. Значения считались для всего набора данных для каждого класса, определялось среднее значение индекса для класса и стандартное отклонение. Исследования показали, что среднее значение индекса для класса нормы равно 0.52, а для патологии составляет 0.56 при среднеквадратичном отклонении (СКО) 0.02. В таблице представлена оценка хориоидальных параметров для двух классов изображений, для которых в дальнейшем определяются эффективные цифровые методы диагностики заболеваний и поддержки принятия решений в процессе лечения. Результаты исследования показали, что полученная оценка признаков хориоидеи позволяет провести классификацию на нормы и патологии по изображениям ОКТ сетчатки для выявления эндокринной офтальмопатии.

Дальнейшие исследования посвящены формированию оценок таких диагностических признаков хориоидального слоя, как яркостные и морфологические параметры хориоидеи, а также текстурные признаки слоя, которые планируется в дальнейшем использовать для выявления патологических изменений.

Сегментация снимков ОКТ, по которым проводился количественный анализ, включающий оценку хориоидальных параметров, является сложным этапом и включает задачу выделения слоев сетчатки, которая в настоящий момент решается на основе нейросетевого подхода. В данный момент нами совместно с врачами производится сбор данных ОКТ для обучения сети и разметка данных. Совместно с Московским стоматологическим университетом им. А.И. Евдокимова (кафедра офтальмологии) нами ведутся обширные научные исследования по выявлению эффективных способов диагностики и лечения глазных заболеваний. Благодаря взаимодействию с врачами проводятся работы по сбору и интерпретации данных пациентов, для которых определяются эффективные цифровые методы для диагностики заболеваний и поддержки принятия решений в процессе лечения.

Заключение. Предложена технология выделения области хориоидеи и количественной оценки хориоидального сосудистого индекса на изображениях оптической когерентной томографии для выявления эндокринной офтальмопатии. Хориоидея представляет собой одну из наиболее васкуляризированных структур человеческого тела и играет незаменимую роль в питании фоторецепторов [25–27]. Таким образом, развитие и исследование новых методов хориоидеи играет важную роль в диагностике эндокринной офтальмопатии (ЭОП) и возрастной макулярной дегенерации (ВМД), это даст возможность увеличить вероятность обнаружения у пациентов признаков ЭОП и ВМД на более ранних стадиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагалова П.А., Ерофеева А.Д., Орлова М.М. и др. Исследование алгоритмов предобработки изображений для повышения эффективности распознавания медицинских снимков // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 25–32.
2. Medeiros F.A., Jammal A.A., Thompson A.C. From Machine to Machine: an OCT-trained Deep Learning Algorithm for Objective Quantification of Glaucomatous Damage in Fundus Photographs // Ophthalmology. 2019. № 126(4). P. 513–521.
3. An G., Omodaka K., Hashimoto K. et al. Glaucoma Diagnosis with Machine Learning Based on Optical Coherence Tomography and Color Fundus Images // Healthcare Engineering. 2019. № 2019.
4. Copete S., Flores-Moreno I., Montero J.A., Duker J.S., Ruiz-Moreno J.M. Direct Comparison of Spectral-Domain and Swept-Source OCT in the Measurement of Choroidal Thickness in Normal Eyes // British J. of Ophthalmology. 2014. № 98 (3). P. 334–338.

5. Ng W.Y., Ting D.S.W., Agrawal R. et al. Choroidal Structural Changes in Myopic Choroidal Neovascularization After Treatment with Antivascular Endothelial Growth Factor Over 1 Year // *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2016. № 57. P. 4933–4939.
6. Kuroda Y., Ooto S., Yamashiro K. et al. Increased Choroidal Vascularity in Central Serous Chorioretinopathy Quantified Using Swept-Source Optical Coherence Tomography // *American J. Ophthalmology.* 2016. № 169. P. 199–207.
7. Vupparaboina K.K., Dansingani K.K., Goud A. et al. Quantitative Shadow Compensated Optical Coherence Tomography of Choroidal Vasculature // *Scientific Reports.* 2018. № 8 (6461).
8. Singh S.R., Vupparaboina K. K., Goud A. et al. Choroidal Imaging Biomarker // *Surv. Ophthalmol.* 2019. № 64. P. 312–333.
9. Park Y., Cho K.J. Choroidal Vascular Index in Patients with Open Angle Glaucoma and Preperimetric Glaucoma // *PLoS ONE.* 2019. № 14 (3).
10. Ozcaliskan S., Balci S., Yenerel N.M. Choroidal Vascularity Index Determined by Binarization of Enhanced Depth Imaging Optical Coherence Tomography Images in Eyes with Intermediate Age-Related Macular Degeneration // *European J. Ophthalmology.* 2020. № 30 (6). P. 1512–1518.
11. Agrawal R., Wei X., Goud A., Vupparaboina K.K., Jana S., Chhablani J. Influence of Scanning Area on Choroidal Vascularity Index Measurement Using Optical Coherence Tomography // *Acta Ophthalmol.* 2017. № 95. P. 770–775.
12. Wei X., Mishra C., Kannan N. B. et al. Choroidal Structural Analysis and Vascularity Index in Retinal Dystrophies // *Acta Ophthalmol.* 2019. № 97 (1). P. 116–121.
13. Gora M., Karnowski K., Szkulmowski M. et al. Ultra High-speed Swept Source OCT Imaging of the Anterior Segment of Human Eye at 200 kHz with Adjustable Imaging Range // *Optics Express.* 2009. № 17. P. 14880–4894.
14. Betzler B.K., Ding J., Wei X. et al. Choroidal Vascularity Index: a Step Towards Software as a Medical Device // *British J. Ophthalmology.* 2022. № 106. P. 149–155.
15. Agrawal R., Salman M., Tan K. A. et al. Choroidal Vascularity Index (CVI)-A Novel Optical Coherence Tomography Parameter for Monitoring Patients with Panuveitis? // *PLoS One.* 2016. № 11 (1). P. e0146344.
16. Girard M.J., Strouthidis N.G., Ethier C.R., Mari J.M. Shadow Removal and Contrast Enhancement in Optical Coherence Tomography Images of the Human Optic Nerve Head // *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* 2011. № 58. P. 7738–7748.
17. Cheong H., Devalla S. K., Chuangsuwanich T. et al. OCT-GAN: Single Step Shadow and Noise Removal From Optical Coherence Tomography Images of the Human Optic Nerve Head // *Biomedical Optics Express.* 2021. № 12. P. 1482–1498.
18. Shin Y.U., Lee S.E., Kang M.H., Han S.W., Yi J.H., Cho H. Evaluation of Changes in Choroidal Thickness and the Choroidal Vascularity Index After Hemodialysis in Patients with End-stage Renal Disease by Using Swept-Source Optical Coherence Tomography // *Med. (Baltim.).* 2019. № 98.
19. Jia Y., Tan O., Tokayer J. et al. Split-spectrum Amplitude-decorrelation Angiography with Optical Coherence Tomography // *Optics Express.* 2012. № 20. P. 4710–4725.
20. Zhang M., Hwang T. S., Campbell J. P. et al. Projection-resolved Optical Coherence Tomographic Angiography // *Biomedical Optics Express.* 2016. № 7. P. 816–828.
21. Tan K.A., Gupta P., Agarwal A. et al. State of Science: Choroidal Thickness and Systemic Health // *Surv. Ophthalmol.* 2016. № 61. P. 566–581.
22. Pellegrini M., Giannaccare G., Bernabei F. et al. Choroidal Vascular Changes in Arteritic and Nonarteritic Anterior Ischemic Optic Neuropathy // *American J. Ophthalmol.* 2019. № 205. P. 43–49.
23. Betzler B.K., Ding J., Wei X. et al. Choroidal Vascularity Index: a Step Towards Software as a Medical Device // *British J. of Ophthalmology.* 2022. № 106. P. 149–155.
24. Iovino C., Pellegrini M., Bernabei F. et al. Choroidal Vascularity Index: An In-Depth Analysis of This Novel Optical Coherence Tomography Parameter // *J. Clin. Med.* 2020. № 9 (2).
25. Lavers H., Zambarakji H. Enhanced Depth Imaging-OCT of the Choroid: a Review of the Current Literature // *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2014. № 252 (12). P. 1871–1883.
26. Agrawal R., Ding J., Sen P. Exploring Choroidal Angioarchitecture in Health and Disease Using Choroidal Vascularity Index // *Progress in Retinal and Eye Research.* 2020. № 77(100829).
27. Sezer T., Altınışık M., Koytak İ.A., Özdemir M.H. The Choroid and Optical Coherence Tomography // *Turk. Oftalmoloji Derg.* 2016. № 46. P. 30–37.